

О. С. Песцов, А. А. Цыганенко, Н. М. Цыганенко

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ SF₆ И NF₃, СОВМЕСТНО АДсорБИРОВАННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ZnO*

Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Рассмотрены проявления резонансного диполь-дипольного (РДД) взаимодействия в ИК-спектрах молекул ³⁴SF₆ и NF₃, совместно адсорбированных на ZnO. Полученные результаты показали, что для NF₃, как и для SF₆, при высоких покрытиях поверхности интенсивные полосы адсорбированных молекул сильнее подвержены влиянию РДД-взаимодействия, чем воздействию со стороны поверхностных центров. Как и для SF₆, полоса ν₃ адсорбированного NF₃ расщепляется на две составляющие, соответствующие коллективным колебаниям слоя с изменением суммарного дипольного момента параллельно или перпендикулярно поверхности. Спектры NF₃, адсорбированного совместно с ³⁴SF₆ на ZnO, не являются суперпозицией спектров индивидуальных адсорбатов, демонстрируя РДД взаимодействие между различными молекулами в адсорбированном состоянии.

Ключевые слова: ИК-спектроскопия, адсорбция, оксид цинка, гексафторид серы, фторид азота, поверхность.

Для цитирования: Песцов О. С., Цыганенко А. А., Цыганенко Н. М. Резонансное взаимодействие между молекулами SF₆ и NF₃, совместно адсорбированными на поверхности ZnO // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 2. С. 106–113. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2018.204>

O. S. Pestsov, A. A. Tsyganenko, N. M. Tsyganenko

RESONANCE INTERACTION BETWEEN SF₆ AND NF₃ COADSORBED ON ZnO SURFACE

St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Manifestations of resonance dipole-dipole (RDD) interaction in IR spectra of ³⁴SF₆ and NF₃ molecules coadsorbed on ZnO are considered. The obtained results show that for NF₃, as for ³⁴SF₆, at high surface coverages, the intense bands of adsorbed molecules are more affected by RDD interaction than by the influence of surface sites. As for ³⁴SF₆, the band ν₃ of adsorbed NF₃ splits into two components corresponding to the collective vibrations of the layer with the change of the total dipole moment parallel or perpendicular to the surface. The spectra of NF₃ coadsorbed with ³⁴SF₆ on ZnO are not the superimposed spectra of individual adsorbates, thus demonstrating RDD interaction between different molecules in the adsorbed state.

Keywords: IR spectroscopy, adsorption, zinc oxide, sulfur hexafluoride, nitrogen trifluoride, surface.

For citation: Pestsov O. S., Tsyganenko A. A., Tsyganenko N. M. Resonance interaction between SF₆ and NF₃ coadsorbed on ZnO surface. *Vestnik of Saint Petersburg University. Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 5 (63), iss. 2. P. 106–113. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2018.204>

1. Введение. Латеральные взаимодействия между адсорбированными молекулами сильно влияют на спектры и свойства адсорбированного слоя [1, 2]. Кроме статическо-

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 17-03-01372.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

го взаимодействия, влияющего на энергию адсорбции и положение полос, существует динамическое, или резонансное, диполь-дипольное (РДД) взаимодействие, которое вызывает смещение полос поглощения и должно учитываться при оценке силы поверхностных центров, характеризующихся с использованием спектров адсорбированных тестовых молекул. РДД-взаимодействие определяет скорость обмена колебательной энергией между адсорбированными молекулами и диссипацию колебательно возбужденных состояний поверхностных соединений (процессов, играющих важную роль в гетерогенном катализе и фотокатализе).

В то время как в спектрах адсорбированного СО проявление РДД-взаимодействия сводится к высокочастотному сдвигу полосы поглощения («динамическому» сдвигу) и изменению её контура, в случае вырожденных колебаний высокосимметричных молекул, таких как SF₆ или CF₄, наиболее интенсивная полоса колебания ν_3 расщепляется на две составляющие, соответствующие разным направлениям изменения дипольного момента при коллективном колебании ансамбля взаимодействующих молекул [1–3]. На плоской поверхности кристалла высокочастотная составляющая принадлежит колебанию перпендикулярно поверхности и по сути своей совершенно аналогична колебанию слоя молекул СО, ориентированных нормально поверхности адсорбента. Низкочастотная полоса принадлежит колебанию дипольного момента параллельно поверхности. При адсорбции на проводящей поверхности металла такое колебание запрещено «поверхностным правилом отбора» [5], тогда как перпендикулярное колебание, напротив, усилено. По этой причине, очевидно, при адсорбции SF₆ на проводящей поверхности графита авторы работы [6] наблюдали лишь одну полосу с повышенной относительно свободной молекулы частотой. Расщепление тем больше, чем выше интенсивность полосы в спектре поглощения. Для колебания ν_3 молекул SF₆ и CF₄, образующих максимальное покрытие поверхности ZnO, оно составляет 65 и 75 см⁻¹ соответственно [3, 4]. Естественно ожидать, что если частоты двух разных молекул в адсорбированном состоянии различаются на сравнимое или меньшее значение, то можно ожидать проявлений РДД-взаимодействия и между разными молекулами. Ранее для молекул в адсорбированном состоянии это явление не исследовалось. В нашей работе мы изучали проявления РДД взаимодействия в спектрах молекул ³⁴SF₆ и NF₃, адсорбированных на поверхности ZnO. Эти молекулы имеют чрезвычайно высокую поглощательную способность, и частота ν_3 молекулы NF₃ (905 см⁻¹ для газа) достаточно близка частоте ν_3 молекулы ³⁴SF₆ (930 см⁻¹ для газа). В работе [3] было показано, что полоса ν_3 ³⁴SF₆ адсорбированного на ZnO при высоких покрытиях распадается на две компоненты с максимумами при 960 и 899 см⁻¹, которые, по данным компьютерного моделирования контура полосы, принадлежат коллективным колебаниям слоя молекул с направлением изменения суммарного дипольного момента параллельно или перпендикулярно поверхности. Частота колебания ν_3 невозмущённых взаимодействием молекул NF₃ лежит внутри этого интервала. В этом случае взаимодействие неизбежно, и его проявления должны быть достаточно отчётливыми.

Адсорбция NF₃ на поверхности ZnO, насколько нам известно, ранее не изучалась, поэтому в настоящей работе мы уделили также внимание изучению зависимости спектра этой молекулы от заполнения поверхности и связи её спектральных проявлений с характером взаимодействия молекул с поверхностью и с геометрией адсорбированного слоя. Молекула имеет ось симметрии третьего порядка, которая, в зависимости от способа взаимодействия с поверхностными центрами, в результате адсорбции может ориентироваться перпендикулярно или параллельно поверхности или иным образом, что может влиять на вид наблюдаемых спектров.

Взаимодействие между молекулами может приводить к появлению полос поглощения так называемых одновременных колебательных переходов, когда один поглощенный квант возбуждает одновременно колебания двух взаимодействующих молекул. Положение полос поглощения таких переходов соответствует сумме частот колебаний этих молекул. Результаты наблюдения данного явления в спектрах адсорбированных молекул приведены в работе [8]: были обнаружены полосы одновременных переходов молекул CO и N₂, адсорбированных на гидроксильных группах поверхности SiO₂, и по интенсивности этих полос был сделан вывод о линейной структуре поверхностных комплексов.

В спектрах растворов ³⁴SF₆ в NF₃ авторы работы [9] выявили слабые полосы при 1692 и 1561 см⁻¹, аналоги которых отсутствуют в спектрах индивидуальных веществ в виде газов, жидкостей или растворов в криогенных растворителях (что показано, например, в работе [10]). Поэтому в нашей работе мы также попытались обнаружить полосы одновременных колебательных переходов в спектрах ³⁴SF₆ и NF₃, совместно адсорбированных на поверхности ZnO.

2. Методика эксперимента. Порошок ZnO (Kadox-15) с удельной поверхностью 50 м²/г прессовали в тонкие таблетки толщиной около 20 мг/см². Образцы предварительно прогревали в вакууме (остаточное давление менее 10⁻⁴ торр) при 723 К в течение 40 мин в кювете, детально описанной ранее [7]. Давление газа в последней измерялось датчиками Edwards Barocel 600. Один из них (для измерения давлений в диапазоне 0–10 торр с погрешностью до 0,001 торр) был связан напрямую с центральной частью кюветы, содержащей образец. Другой (для измерения давлений до 1000 торр с погрешностью 0,1 торр) был присоединён к дозирующему объём сосуда с ловушкой. Для измерения температуры в охлаждаемую часть кюветы, по возможности ближе к образцу, вводили термопару. Спектры регистрировали при помощи ИК-фурье-спектрометра Nicolet 710, оснащённого охлаждаемым детектором МСТ. Спектры записывали, как правило, с разрешением 4 см⁻¹ с 256 сканированиями.

Чтобы предотвратить восстановление ZnO и выжечь органические загрязнения, во время термообработки за 10 мин до конца откачки в часть кюветы с образцом впускали кислород (под давлением около 10 торр), а затем образец охлаждали при давлении кислорода около 1 торр. Затем кювету охлаждали жидким азотом, причём для достижения лучшего теплового контакта между образцом и охлаждаемой частью кюветы в часть кюветы с образцом напускали гелий при давлении 0,5 торр. После записи исходного спектра при 77 К адсорбировали исследуемые молекулы. Для этого использовали промышленные вещества, которые перед адсорбцией очищали путём откачки невымораживаемых при 77 К газов. Изотопное содержание серы в составе используемого ³⁴SF₆, согласно паспортным данным, составляло: 99,56% ³⁴S, 0,25% ³⁶S, 0,13% ³³S и 0,06% ³²S.

Дозу ³⁴SF₆ (около 50 мкмоль) впускали в кювету при температуре около 200 К, затем (во избежание десорбции и конденсации адсорбата на стенках при резком их охлаждении) температуру плавно доводили до 77 К. Так как NF₃ при 77 К имеет заметное давление пара, для начала адсорбции было достаточно контакта образца с предварительно вымороженным NF₃. Постепенно увеличивая время экспозиции вплоть до момента, когда в части кюветы с образцом устанавливалось постоянное давление газа, получали зависимость спектра от заполнения поверхности ZnO адсорбатом.

Чтобы осуществить совместную адсорбцию ³⁴SF₆ и NF₃, мы вначале проводили адсорбцию ³⁴SF₆, затем образец охлаждали до 77 К. Поскольку при такой температуре адсорбированные молекулы не способны десорбироваться, количество адсорбирован-

ных молекул $^{34}\text{SF}_6$ не изменялось. Последовательно добавляя NF_3 при 77 К, получали зависимость спектра совместно адсорбированных молекул от количества NF_3 . Чтобы убедиться, что насыщение поверхности достигнуто, температуру в кювете понижали примерно до 60 К путём откачки азота из охлаждаемой части кюветы. Чтобы проверить обратимость наблюдаемых изменений, спектры регистрировали также при последовательном удалении NF_3 с насыщенного образца путём откачки газа и последующего добавления гелия. Оставляя кювету с максимальным количеством газа согреваться, отслеживали также температурную зависимость спектра совместно адсорбированных молекул.

3. Результаты экспериментов. Спектры, наблюдаемые при совместной адсорбции NF_3 с $^{34}\text{SF}_6$ на ZnO , показаны на рис. 1. Согласно ранее полученным данным [5], в области колебания ν_3 адсорбированного $^{34}\text{SF}_6$ присутствует пара интенсивных полос при 960 и 899 см^{-1} . По мере увеличения количества NF_3 высокочастотная полоса начинает смещаться в сторону низких частот вплоть до 930 см^{-1} . Низкочастотная полоса менее чувствительна к добавлению NF_3 , но также смещается в сторону низких частот, превращаясь в узкий интенсивный пик при 890 см^{-1} . На высокочастотном плече полосы 890 см^{-1} образуется характерная дырка Эванса (Evans' hole) при 899 см^{-1} , положение которой совпадает с низкочастотной компонентой расщеплённой полосы поглощения $^{34}\text{SF}_6$. Кроме того, в результате добавления NF_3 наблюдается рост поглощения в области 958 см^{-1} с максимумом, почти совпадающим с положением наблюдаемой ранее в спектре полосы $^{34}\text{SF}_6$ при 960 см^{-1} . На финальной стадии добавления NF_3 , когда адсорбированный слой оказывается в равновесии с насыщающими парами адсорбата, вырастает полоса 924 см^{-1} и более широкая полоса при 880 см^{-1} , наблюдаемая как низкочастотное плечо полосы 890 см^{-1} .

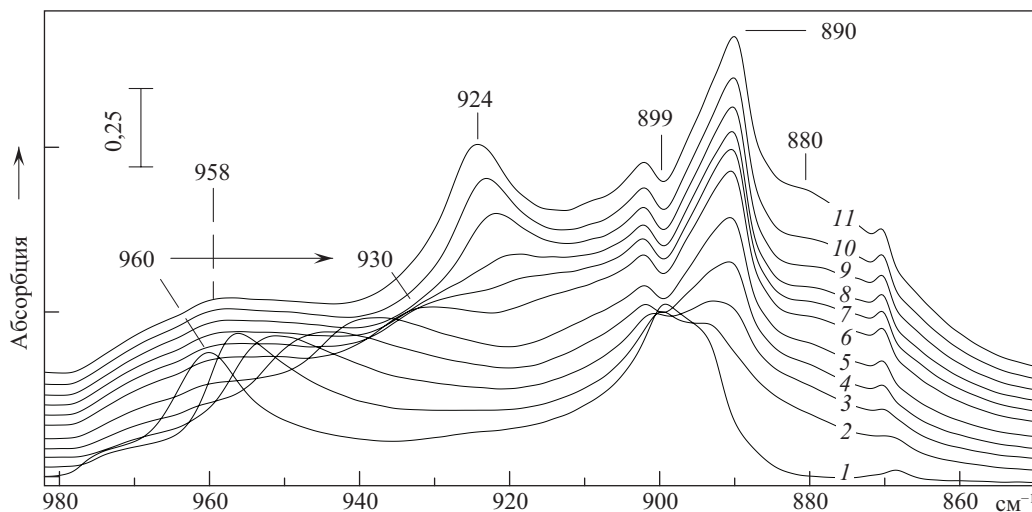


Рис. 1. ИК-спектр ZnO после адсорбции $^{34}\text{SF}_6$ и охлаждения до 77 К (1), а также после добавления 10 последовательных доз NF_3 вплоть до насыщения (2–11)

При адсорбции NF_3 на поверхности ZnO (рис. 2) наблюдался похожий характер изменения спектра, что и для SF_6 [3]. Первоначально полоса колебания ν_3 возникает при 897 см^{-1} . По мере увеличении количества адсорбированных молекул она расщепляется на две, причём расщепление увеличивается с ростом покрытия вплоть до 44 см^{-1} ,

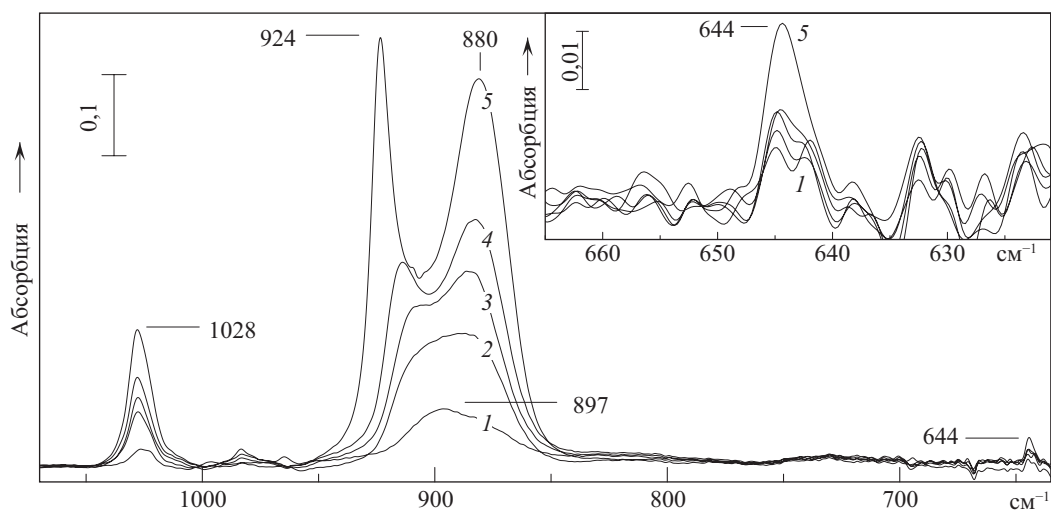


Рис. 2. Изменение ИК-спектра ZnO по мере добавления NF_3 вплоть до насыщающего покрытия (1–5)

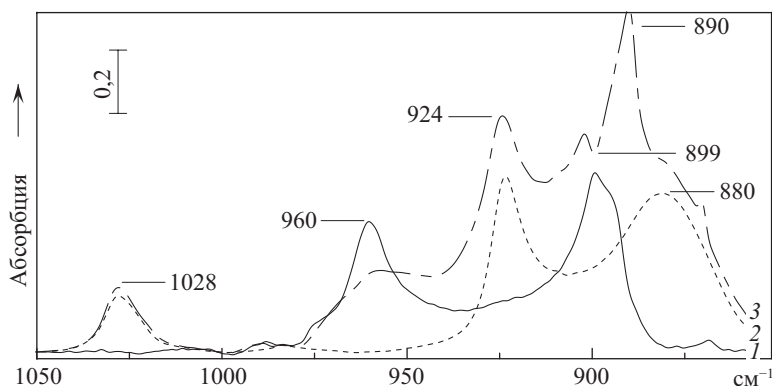


Рис. 3. ИК-спектр ZnO с адсорбированным $^{34}\text{SF}_6$ (1), после добавления насыщающей дозы NF_3 при 77 K (2) и после адсорбции NF_3 на чистом образце ZnO (3)

а интегральная интенсивность низкочастотной полосы примерно вдвое выше, чем у высокочастотной. Одновременно растут более слабые полосы поглощения, соответствующие колебаниям ν_1 и ν_2 при 1028 и 644 см^{-1} . По мере роста покрытия эти полосы не смещаются и не расщепляются, оставаясь симметричными и узкими. Полуширина их при разрешении прибора 1 см^{-1} составляет около 10 и 2 см^{-1} соответственно.

Рис. 3 позволяет сравнить спектр совместно адсорбированных $^{34}\text{SF}_6$ с NF_3 со спектрами этих веществ, адсорбированных отдельно. Отметим, что две полосы, вырастающие при 924 и 880 см^{-1} на последней стадии добавления NF_3 при коадсорбции с $^{34}\text{SF}_6$, практически совпадают с двумя наиболее интенсивными полосами NF_3 , адсорбированного отдельно. Однако выделить в спектре совместно адсорбированных молекул полосы индивидуально адсорбированного $^{34}\text{SF}_6$ не представляется возможным, и спектр, наблюдаемый при совместной адсорбции, вовсе не является суммой спектров двух ве-

ществ, адсорбированных отдельно. Тщательное изучение спектров совместно адсорбированных молекул позволило увидеть слабые полосы составных частот обеих молекул, однако нам не удалось выделить полосы, отсутствующие в спектрах отдельно адсорбированных $^{34}\text{SF}_6$ или NF_3 , которые можно было бы приписать одновременным колебательным переходам.

4. Обсуждение результатов. Спектр адсорбированного $^{34}\text{SF}_6$, полученный в этой работе, хорошо согласуется с данными предшествующего исследования, согласно которым расщепление полосы колебания ν_3 молекул $^{32}\text{SF}_6$ составляло также около 60 см^{-1} , что намного больше вызванного адсорбцией сдвига частоты изолированных молекул при малых покрытиях поверхности (5 см^{-1}). Влияние адсорбции на частоты адсорбированного NF_3 также крайне слабо. Сдвиги частот колебаний ν_1 , ν_3 и ν_2 по отношению к частотам свободной молекулы (1032 , 905 и 647 см^{-1}) составляют лишь -4 , -8 и -3 см^{-1} соответственно, что также гораздо меньше величины расщепления полосы колебания ν_3 (44 см^{-1}). Эти данные позволяют утверждать, что, как и в случае SF_6 , наблюдаемое расщепление целиком обязано РДД-взаимодействию адсорбированных молекул между собой, а не является следствием присутствия на поверхности ZnO различных по силе центров.

Согласно модели, применявшейся при расчёте спектра адсорбированного SF_6 [3], высокочастотная составляющая полосы ν_3 , принадлежащая коллективному колебанию с изменением дипольного момента, перпендикулярному поверхности адсорбента, должна быть вдвое слабее низкочастотной полосы колебания, параллельного поверхности. Для молекул NF_3 при их упорядоченном расположении с ориентацией оси третьего порядка перпендикулярно поверхности можно было бы ожидать существенно более высокой интенсивности низкочастотной полосы, поскольку колебанию ν_3 соответствует изменение дипольного момента перпендикулярно оси молекулы. Наблюдаемое соотношение интенсивностей двух компонентов расщепления лучше всего соответствует неупорядоченному взаимному расположению взаимодействующих молекул в плоском адсорбционном слое.

Образования упорядоченного слоя молекул NF_3 на поверхности ZnO можно было бы ожидать, если бы атомы азота адсорбированных молекул образовывали координационную связь с катионными центрами поверхности ZnO , подобно тому, как это происходит при адсорбции CO или NH_3 . В последнем случае образование такой связи приводит к сильному повышению частоты симметричного деформационного колебания ν_2 адсорбированных молекул [11]. Если бы молекулы NF_3 (как и молекулы NH_3) подобным образом связывались с поверхностью ZnO , можно было бы также ожидать повышения частоты колебания ν_2 . Однако полоса этого колебания слабо смещается в сторону низких частот, оставаясь при этом чрезвычайно узкой, что ещё раз свидетельствует об отсутствии сколь-нибудь сильного взаимодействия NF_3 с катионными центрами поверхности ZnO . Об этом же свидетельствует слабое смещение частоты колебания ν_1 и слабое уширение полосы этого колебания при переходе NF_3 в адсорбированное состояние.

Тот факт, что при совместной адсорбции спектры, показанные на рис. 2, не являются суммой спектров индивидуально адсорбированных молекул, безусловно, свидетельствует о сильном РДД-взаимодействии между молекулами различного состава. Примечательно, что при значительном количестве адсорбированного NF_3 в спектре можно выделить те же полосы, что и при его адсорбции на чистой поверхности. Тем не менее наличие провала при 899 см^{-1} , по форме сильно напоминающего «дырку Эванса» в спектре адсорбированного CF_4 [4], по положению совпадающего с максимумом

полосы низкочастотной составляющей дублета адсорбированного $^{34}\text{SF}_6$, трудно объяснить иначе, чем ферми-резонансом между этим колебанием и континуумом поглощения в спектре слоя адсорбированного NF_3 . Ещё сильнее изменяется под действием добавления NF_3 спектр предварительно адсорбированного $^{34}\text{SF}_6$. Трудно представить себе, что смещение высокочастотной составляющей полосы колебания ν_3 под действием адсорбции даже малых количеств NF_3 при не столь сильных изменениях в спектре последнего является результатом только РДД-взаимодействия. Вполне вероятно, что по мере адсорбции NF_3 происходит частичное вытеснение $^{34}\text{SF}_6$ из приповерхностного слоя с нарушением геометрии взаимного расположения молекул, в то время как адсорбированный NF_3 образует слой поверх слоя SF_6 . Тогда полосу при 958 см^{-1} можно было бы приписать вытесненным в верхний слой молекулам $^{34}\text{SF}_6$, частота колебаний которых повышена вследствие РДД-взаимодействия с окружающими молекулами NF_3 .

Факт, что в наблюдаемых спектрах совместно адсорбированных молекул отсутствуют полосы поглощения, которые могли бы принадлежать одновременным колебательным переходам, очевидно, связан с крайне низкой интенсивностью этих полос, не позволяющей выделить их на фоне шумов.

5. Заключение. Исследование совместной адсорбции NF_3 и $^{34}\text{SF}_6$ на ZnO указывает на сильное РДД взаимодействие между ними, в результате которого спектр совместно адсорбированных молекул отличается от суммарного спектра молекул, адсорбированных раздельно. Таким образом, между различными молекулами в адсорбированном слое происходит активный обмен энергией колебательного возбуждения. Спектральных проявлений одновременных колебательных переходов в проведённых экспериментах по совместной адсорбции $^{34}\text{SF}_6$ и NF_3 наблюдать не удалось.

Литература

1. Dobrovorskaia A. N., Pestsov O. S., Tsyganenko A. A. Lateral interaction between molecules adsorbed on the surfaces of non-metals // *Topics in Catalysis*. 2017. Vol. 60, iss. 19–20. P. 1506–1521.
2. Tsyganenko A. A. Low temperature infrared spectroscopy of surface species // *Physics and chemistry at low temperatures* / ed. by L. Khriachtchev. World Scientific, 2011. P. 267–296.
3. Dobrovorskaia A. N., Kolomiitsova T. D., Petrov S. N., Shchepkin D. N., Tsyganenko A. A. Effect of resonance dipole-dipole interaction on spectra of adsorbed SF_6 molecules // *Spectrochimica Acta (A)*. 2015. Vol. 148. P. 271–279.
4. Dobrovorskaia A. N., Gatilova A. V., Murzin P. D., Rudakova A. V., Shchepkin D. N., Tsyganenko A. A. Effect of resonance dipole-dipole interaction on the spectra of adsorbed CF_4 . Experimental investigation and theoretical modeling // *J. Photochem. Photobiol. (A)*. 2018. Vol. 354. P. 4–10.
5. Pearce H. A., Sheppard N. Possible importance of a “metal-surface selection rule” in the interpretation of the infrared spectra of molecules adsorbed on particulate metals; infrared spectra from ethylene chemisorbed on silica-supported metal catalysts // *Surface Sci.* 1976. Vol. 59, N 1. P. 205–217.
6. Thomas P., Xia Y., Boyd D. A., Hopkins T. A., Hess G. B. Study of SF_6 adsorption on graphite using infrared spectroscopy // *J. Chem. Phys.* 2009. Vol. 131. 124701.
7. Tsyganenko A. Variable temperature IR spectroscopy in the studies of oxide catalysts // *Topics in Catalysis*. 2013. Vol. 56, iss. 11. P. 905–913.
8. Смирнов К. С., Никольская М. А., Цыганенко А. А. Исследование одновременных колебательных переходов простых молекул, адсорбированных на гидроксильных группах поверхности SiO_2 // *Опт. и спектр.* 1987. Т. 62, № 6. С. 1256–1262.
9. Бочаров В. Н., Бурцев А. П., Дубровская Е. В., Коломийцова Т. Д., Щепкин Д. Н. Наблюдение одновременных переходов $\nu_1(\text{SF}_6) + \nu_3(\text{NF}_3)$ и $\nu_2(\text{SF}_6) + \nu_3(\text{NF}_3)$, усиленных резонансным диполь-дипольным взаимодействием с колебательными состояниями $\nu_1 + \nu_3$ и $\nu_2 + \nu_3$ молекулы SF_6 // *Опт. и спектр.* 2010. Т. 108, № 4. С. 569–579.
10. Берцев В. В., Коломийцева Т. Д., Цыганенко Н. М. Инфракрасные спектры криосистем. 2. Шестифтористая сера // *Опт. и спектр.* 1974. Т. 37, вып. 3. С. 463–466.
11. Tsyganenko A. A., Pozdnyakov D. V., Filimonov V. N. Infrared study of surface species arising from ammonia adsorption on oxide surfaces // *J. Mol. Struct.* 1975. Vol. 29, N 2. P. 299–318.

References

1. Dobrotvorskaia A. N., Pestsov O. S., Tsyganenko A. A. Lateral interaction between molecules adsorbed on the surfaces of non-metals. *Topics in Catalysis*, 2017, vol. 60, iss. 19–20. P 1506–1521.
2. Tsyganenko A. A. Low temperature infrared spectroscopy of surface species. *Physics and chemistry at low temperatures*. Ed. by L. Khriachtchev. World Scientific, 2011, pp. 267–296.
3. Dobrotvorskaia A. N., Kolomiitsova T. D., Petrov S. N., Shchepkin D. N., Tsyganenko A. A. Effect of resonance dipole-dipole interaction on spectra of adsorbed SF₆ molecules. *Spectrochimica Acta (A)*, 2015, vol. 148, pp. 271–279.
4. Dobrotvorskaia A. N., Gatilova A. V., Murzin P. D., Rudakova A. V., Shchepkin D. N., Tsyganenko A. A. Effect of resonance dipole-dipole interaction on the spectra of adsorbed CF₄. Experimental investigation and theoretical modeling. *J. Photochem. Photobiol. (A)*, 2018, vol. 354, pp. 4–10.
5. Pearce H. A., Sheppard N. Possible importance of a “metal-surface selection rule” in the interpretation of the infrared spectra of molecules adsorbed on particulate metals; infrared spectra from ethylene chemisorbed on silica-supported metal catalysts. *Surface Sci.*, 1976, vol. 59, no 1, pp. 205–217.
6. Thomas P., Xia Y., Boyd D. A., Hopkins T. A., Hess G. B. Study of SF₆ adsorption on graphite using infrared spectroscopy. *J. Chem. Phys.*, 2009, vol. 131. 124701.
7. Tsyganenko A. Variable temperature IR spectroscopy in the studies of oxide catalysts. *Topics in Catalysis*, 2013, vol. 56, iss. 11, pp. 905–913.
8. Smirnov K. S., Nikolskaya M. A., Tsyganenko A. A. Simultaneous vibrational transitions of simple molecules adsorbed on the hydroxyl groups of an SiO₂ surface. *Optics and spectroscopy*, 1987, vol. 62, N 6, pp. 743–747.
9. Bocharov V. N., Burtsev A. P., Dubrovskaya E. V., Kolomiitsova T. D., Shchepkin D. N. Observation of simultaneous $\nu_1(\text{SF}_6) + \nu_3(\text{NF}_3)$ and $\nu_2(\text{SF}_6) + \nu_3(\text{NF}_3)$ transitions enhanced by resonance dipole-dipole interaction with the $\nu_1 + \nu_3$ and $\nu_2 + \nu_3$ states of the SF₆ molecule. *Optics and spectroscopy*, 2010, vol. 108, no 4, pp. 533–543.
10. Bertsev V. V., Kolomiitseva T. D., Tsyganenko N. M. Infrared spectra of cryosystems. 2. Sulphur hexafluoride. *Optics and spectroscopy*, 1974, vol. 37, no 3, pp. 263–265.
11. Tsyganenko A. A., Pozdnyakov D. V., Filimonov V. N. Infrared study of surface species arising from ammonia adsorption on oxide surfaces. *J. Mol. Struct.*, 1975, vol. 29, no 2, pp. 299–318.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2018 г.

Контактная информация

Песцов Олег Сергеевич — аспирант; e-mail: olpescov@yandex.ru

Цыганенко Алексей Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, проф.; e-mail: atsyg@yandex.ru

Цыганенко Наталья Михайловна — канд. физ.-мат. наук; e-mail: ntsyg@yandex.ru

Oleg S. Pestsov — post-graduate student; e-mail: olpescov@yandex.ru

Alexey A. Tsyganenko — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor;
e-mail: atsyg@yandex.ru

Natalia M. Tsyganenko — PhD; e-mail: ntsyg@yandex.ru